



УДК 621.791:624.073

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНОГО УЗЛА АРОЧНОГО ПИЛОНА МОСТА

О. В. МАХНЕНКО, канд. техн. наук, академик НАН Украины В. И. МАХНЕНКО  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Применительно к сварному узлу арочного пилон моста выполнено прогнозирование долговечности его сварных соединений на основе представленной информации о спектре нагрузок и номинальных напряжениях в них.

*Ключевые слова:* сварные узлы, спектр нагрузок, долговечность соединений, циклическая прочность, расчетное прогнозирование

В настоящее время сварные конструкции находят все более широкое применение в мостостроении. На рис. 1 показана схема сварного узла арочного пилон из низколегированной стали 10ХСНД (ГОСТ 6713–75) в виде фигурной коробчатой балки из листов толщиной 32 мм, выполненного с помощью сварки в защитных газах. К стенке балки по осям 1, 2 тавровыми соединениями № 3 (табл. 1) по всей длине, исключая участки между узловыми точками 82 и 213 и 597 и 433, приварены продольные брикеты толщиной 20 мм. Между узлами 82 и 213 и 597 и 433 используются соответствующие соединения № 2 и 22 (табл. 1). По осям 3 и 4 приварены поперечные брикеты соединениями № 21 и 20.

Необходимо было оценить долговечность сварных соединений из условия инициирования усталостных разрушений в «горячих» точках А и В (см. рисунки в табл. 1), учитывая соответствующие нормальные номинальные мембранные напряжения.

В табл. 2 приведены выборочные результаты численного анализа номинального напряженного состояния в наиболее характерных точках вдоль осей 1–4 в направлении, способствующем образованию продольных усталостных трещин в точках А, В. При этом значения  $\sigma_{\Pi}^H$  соответствуют распределению напряжений от постоянных нормативных нагрузок, напряжения  $\sigma_{врI}^H$  и  $\sigma_{врII}^H$  — то же от дополнительных временных нормативных нагрузок. По этим данным можно выделить три варианта циклов переменного нагружения с крайними точками цикла по напряжениям:

- 1) от  $(\sigma_{\Pi}^H + \sigma_{врI}^H)$  до  $\sigma_{\Pi}^H$ ,  $\Delta\sigma_1 = |\sigma_{врI}^H|$ ;
- 2) от  $(\sigma_{\Pi}^H + \sigma_{врII}^H)$  до  $\sigma_{\Pi}^H$ ,  $\Delta\sigma_2 = |\sigma_{врII}^H|$ ;
- 3) от  $(\sigma_{\Pi}^H + \sigma_{врI}^H)$  до  $(\sigma_{\Pi}^H + \sigma_{врII}^H)$ ,  $\Delta\sigma_3 = |\sigma_{врI}^H - \sigma_{врII}^H|$ ;

где  $\Delta\sigma_j$  — размах изменения напряжений в цикле  $j = 1...3$ . Максимальные и минимальные значения  $\sigma_{\max}^j$  и  $\sigma_{\min}^j$  определяются указанными крайними точками в зависимости от  $\sigma_{\Pi}^H$ ,  $\sigma_{врI}^H$ ,  $\sigma_{врII}^H$  (рис. 2).

Продольные нормальные номинальные напряжения вдоль осей 1 и 2 по данным численного анализа характеризуются значениями  $\sigma_{\Pi}^H = -134,9$  МПа при  $\Delta\sigma = 20,8$  МПа, незначительно изменяющемся вдоль сварных соединений по осям 1 и 2. Необходимо было оценить долговечность рассматриваемых сварных соединений сначала из наиболее консервативного варианта циклического нагружения (1) по заданным значениям из табл. 2, а затем в точках, где рассчитанная долговечность не укладывается в требование  $2 \cdot 10^6$  циклов, провести более точный расчет, исходя из спектра нагружения (1) при различных долях  $\alpha_j$  количества  $j$ -й составляющей спектра.

**Расчетная методика.** Для определения долговечности сварных соединений, представленных в табл. 1, для которых трещинообразные дефекты типа непроплавления недопустимы, использовали методику, разработанную в Международном институте сварки для оценки долговечности такого типа сварных соединений на основе возникновения усталостной трещины в зоне перехода от металла сварного шва к основному металлу («го-

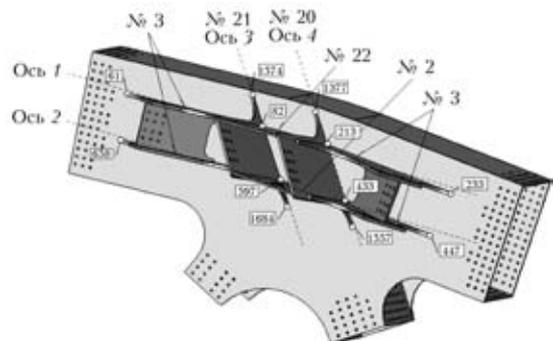


Рис. 1. Схема сварного узла арочного пилон с указанием осей 1–4, вдоль которых необходимо оценить долговечность сварных соединений № 2, 3, 20–22 (цифры в рамке — контрольные точки, узлы)



Таблица 1. Сварные соединения, подлежащие расчету на прочность

№ шва	Стандарт	Эскиз сварного соединения	Характеристики, учитываемые при расчете	Расположение узла на схеме
<i>Стандартные</i>				
2	ГОСТ 23518-79	<p>T4-ИП(УП)</p>	<p>Двухстороннее тавровое сварное соединение со скосом кромки с одной стороны. Полное проплавление</p>	Вдоль оси 2: между узлами 597 и 433
3	ГОСТ 23518-79	<p>T7-ИП(УП)</p>	<p>Двухстороннее тавровое сварное соединение со скосом кромок с двух сторон. Полное проплавление</p>	<p>Вдоль оси 1: между узлами 61 и 82; 213 и 233. Вдоль оси 2: между узлами 658 и 597; 433 и 447</p>
<i>Нестандартные (дуговая сварка в среде защитных газов)</i>				
20	ГОСТ 14771-76*		Полное проплавление	Вдоль оси 4: между узлами 1377 и 1557
21	ГОСТ 14771-76*		» »	Вдоль оси 3: между узлами 1574 и 1684
22	ГОСТ 14771-76*		» »	Вдоль оси 1: между узлами 82 и 213



Т а б л и ц а 2. Исходные значения номинальных напряжений в поперечном сечении сварного шва вдоль осей 1–4

№ п/п	Ось 1			Ось 2				
	№ узла (МКЭ)	$\sigma_{п}^H$ , МПа	$\sigma_{врI}^H$ , МПа	$\sigma_{врII}^H$ , МПа	№ узла (МКЭ)	$\sigma_{п}^H$ , МПа	$\sigma_{врI}^H$ , МПа	$\sigma_{врII}^H$ , МПа
1	61	3,4	1,5	1,0	658	3,0	1,2	1,0
2	82	8,4	-12,7	0,5	5220	-53,7	-26,6	-2,5
3	76	-40	-25,1	-1,6	672	-53,5	-29,2	-2,8
4	7130	-35,6	-29,4	-1,9	5217	-52,9	-32,2	-3,1
5	77	-39,9	-32,2	-2,9	673	-51,7	-39,3	-3,3
6	7126	-30,5	-34,5	-2,2	5214	-49,8	-35,1	-3,4
7	78	-24,6	33,4	-1,9	674	-47,2	-34,0	-3,3
8	7124	-13,7	-28,1	-1,3	5211	-43,0	-30,7	-3,0
9	79	-6,4	-2,34	-0,7	597	21,4	0,4	0,2
10	213	24,9	4,5	2,7	433	-25,5	-2,6	-1,0
11	233	1,6	0	0	447	5,5	0,5	1,0

Окончание табл. 2

№ п/п	Ось 3			Ось 4				
	№ узла (МКЭ)	$\sigma_{п}^H$ , МПа	$\sigma_{врI}^H$ , МПа	$\sigma_{врII}^H$ , МПа	№ узла (МКЭ)	$\sigma_{п}^H$ , МПа	$\sigma_{врI}^H$ , МПа	$\sigma_{врII}^H$ , МПа
1	1574	1	0	0	1377	0,7	0,1	0,1
2	1578	11,2	3,5	1,7	1404	43,7	5,3	2,7
3	1657	41,6	1,6	1,5	6773	34,4	4,7	2,7
4	2549	43,6	1,4	1,1	3214	48,2	6,6	2,7
5	2552	432	1,6	0,9	3207	49,8	6,7	2,5
6	2555	41,3	1,9	0,7	1403	49,4	6,4	2,6
7	1656	43,3	1,4	1,3	1402	49,7	6,9	2,5
8	1654	42,4	1,7	0,8	1401	48,1	7,1	2,3
9	1653	39,6	2,1	0,8	1399	40,2	7,2	1,6
10	1652	33,3	2,7	5,5	433	-25,5	2,6	-1,0
11	1684	1,8	0	0	1557	1,7	0,3	0,1

рячие» точки *A* либо *B*). Эта методика обобщает большой объем экспериментальных исследований для типовых сварных соединений, что позволяет для каждого из них сформулировать рекомендации по определению допустимого размаха номинальных напряжений при регулярном нагружении в виде

$$[\Delta\sigma] = \frac{FAT f_1(R) f_2(N) f_3(\partial) f_4(T)}{\gamma_M}, \quad (2)$$

где *FAT* — класс соединения или допустимый размах напряжений для данного соединения на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов регулярного нагружения (постоянные параметры цикла нагрузки) при  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \gamma_M = 1,0$ ;  $\gamma_M$  — коэффициент безопасности.

В данном документе МИСа\* приведена таблица значений *FAT* для различных типовых свар-

ных соединений. Рассматриваемые соединения из табл. 1 при отсутствии непроплавлений и выполнении сварочных работ в нижнем положении соответствуют варианту шва № 411, для которого *FAT* = 80 МПа (табл. 3). Если зона перехода от сварного шва к основному металлу не обработана, то сварные соединения соответствуют № 412 и *FAT* = 71 МПа (для рассматриваемых сварных соединений принимаем *FAT* = 71 МПа).

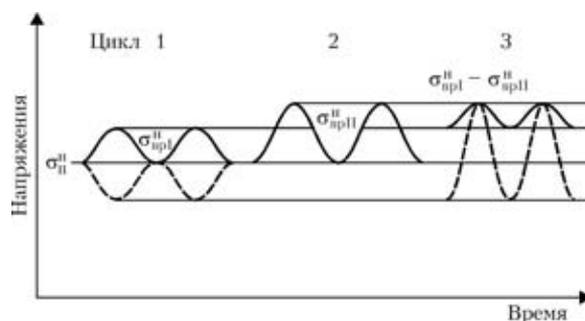


Рис. 2. Графическая интерпретация циклов нагружения (1) при одинаковых  $\sigma_{вр}^H$  (сплошная кривая) и различных (штриховая) знаках

\* Recommendations for fatigue design of welded joints and components. — [2002]. — 153 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96/XV-845-96).



В выражении (2) множитель  $f_1(R)$  учитывает влияние асимметрии цикла нагружения

$$R = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{\max}}, \quad (3)$$

а также уровень остаточных напряжений в зоне соединения.

В случае, если остаточные напряжения не превышают  $0,2\sigma_T$  (для стали 10ХСНД  $\sigma_T \approx 400$  МПа), то согласно документу МИСа:

$$\begin{aligned} f_1(R) &= 1,6 && \text{для } R < -1,0; \\ f_1(R) &= -0,4R + 1,2 && \text{для } -1,0 \leq R \leq 0,5; \\ f_1(R) &= 1,0 && \text{для } R > 0,5. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае, если остаточные напряжения больше  $0,2\sigma_T$  (примерно 80 МПа для рассматриваемого случая), либо имеет место сочетание двух- или трехмерных элементов, то  $f_1(R) = 1,0$ , т. е. значение множителя  $f_1(R)$  для зависимости (2) минимальное. Для рассматриваемого случая можно принять  $f_1(R) = 1,0$ .

Множитель  $f_2(N)$  учитывает ограниченную усталость. В диапазоне  $10^4 < N < 5 \cdot 10^6$  циклов  $f_2(N)$ , согласно методике МИСа (рис. 3, 4), определяется зависимостью

$$f_2(N) = \left(\frac{C}{N}\right)^{1/m}, \quad (5)$$

где  $N$  — долговечность сварного соединения;  $C = 2 \cdot 10^6$ ,  $m = 3$  при  $10^4 < N < 5 \cdot 10^6$  циклов и  $C = 2,54 \cdot 10^6$ ,  $m = 5$  при  $5 \cdot 10^6 < N < 10^8$  циклов.

Поправка на толщину примыкающего элемента, где возникает усталостная трещина,  $f_3(\delta) = 1,0$ , если толщина  $\delta < 25$  мм. При больших толщинах

$$f_3(\delta) = \left(\frac{25}{\delta}\right)^{0,3}. \quad (6)$$

Для рассматриваемых соединений  $f_3(\delta) = 1,0$ .

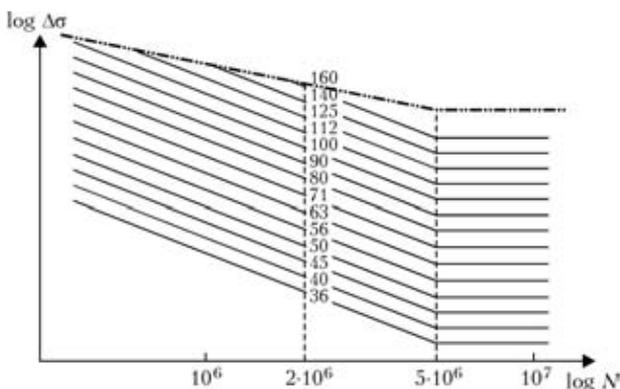


Рис. 3. Обобщенные кривые Веллера для различных FAT (сталь) при  $m = 3$  для нормальных номинальных напряжений при  $N < 5 \cdot 10^6$  циклов

Множитель  $f_4(T)$  учитывает рабочую температуру  $T$  эксплуатации соединения. В соответствии с документом МИСа при  $T < 100$  °С можно принимать  $f_4(T) = 1,0$ .

С учетом изложенного выше для рассматриваемых сварных соединений зависимость (2) можно представить в виде

$$[\Delta\sigma] = \frac{FAT}{\gamma_M} \left(\frac{C}{N}\right)^{1/m}. \quad (7)$$

Соответственно предельная долговечность  $N_j$  при регулярном нагружении с размахом  $\Delta\sigma_j$  из (7) выражается следующим образом:

$$N_j = C \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma_j \gamma_M}\right)^m. \quad (8)$$

При выборе коэффициента безопасности  $\gamma_M$  следует учитывать, что FAT рекомендуют на уровне 0,95 вероятности неразрушения экспериментальных данных. Поэтому в документе рекомендуют выбирать  $\gamma_M$  в пределах 1...1,4 ( $\gamma_M = 1,4$  соответствует случаю, когда существует угроза человеческой жизни).

Соответственно приняв  $\gamma_M = 1,4$  и  $FAT = 71$  МПа, из (8) получим

$$N_j = C \left(\frac{51}{\Delta\sigma_j}\right)^m, \quad (9)$$

где  $C = 2 \cdot 10^6$ ,  $m = 3$  при  $10^4 < N_j < 5 \cdot 10^6$  циклов;  $C = 2,54 \cdot 10^6$ ,  $m = 5$  при  $5 \cdot 10^6 < N_j < 10^8$  циклов.

Зависимость (9) можно использовать для определения долговечности по наиболее консервативному варианту регулярного циклического нагружения (1) исходя из данных табл. 2.

В случае учета спектра нагружения из трех регулярных циклов, отражаемых зависимостями (1), долговечность  $N_{\text{спек}}$  определяется путем линейного суммирования повреждаемостей (метод Пальмгрена–Майнера):

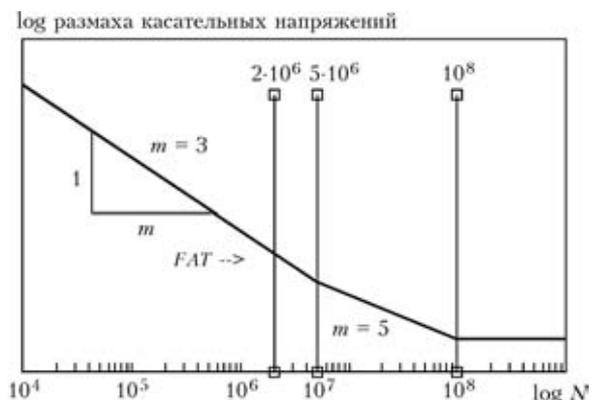
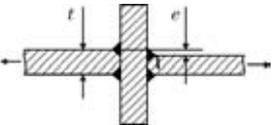
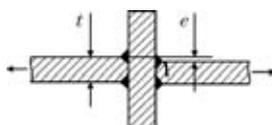
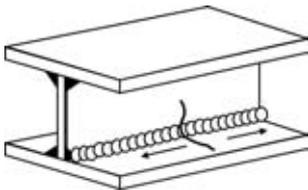
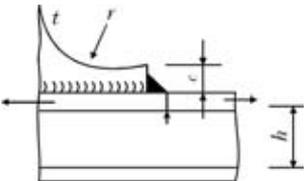


Рис. 4. Кривая Веллера для некоторого FAT при  $N < 10^8$  циклов



Таблица 3. Типы сварных соединений и соответствующие для них значения *FAT* применительно к узлу арочного пилона

№ шва	Эскиз соединения	Характеристики	<i>FAT</i> , МПа
411		Крестовое или Т-образное соединение с К-образной разделкой кромок примыкающих элементов, полное проплавление, смещение $e < 0,15t$ . Зона перехода обработана	80
412		То же, что и для № 411, но зона перехода не обработана	71
323		Продольные сплошные угловые швы, ручная сварка с К-образной разделкой кромок либо без нее (напряжения в полке)	90
522		Продольная косынка с радиусом $r > 150$ мм приварена угловыми швами. Швы обработаны; $c < 2t$ , $c_{max} = 25$ мм	90

$$\sum_{j=1}^M \frac{n_j}{N_j} = 1, \tag{10}$$

где  $n_j$  — количество  $j$ -х циклов с размахом  $\Delta\sigma_j$ .

Если  $n_j = \alpha_j N_{спек}$ , где  $\alpha_j$  — доля  $j$ -го нагружения в общем нагружении на базе  $N_{спек}$  циклов, то из (10) следует

$$N_{спек} = \left( \sum_{j=1}^M \frac{\alpha_j}{C_j [\frac{51}{(\Delta\sigma_j)}]^{m_j}} \right)^{-1}. \tag{11}$$

Что касается методических вопросов оценки циклической прочности рассматриваемых соединений по осям 1 и 2 вдоль сварных швов (см. рис. 1), то в соответствии с исходными данными в стенке узла пилона толщиной 32 мм, к которой привариваются примыкающие элементы швами № 2, 3 и 22, действуют нормативные постоянные напряжения  $\sigma_{zz}^H = -134,9$  МПа при размахе  $\Delta\sigma^H = 20,8$  МПа вдоль указанных осей. Под действием такой нагрузки могут возникать поперечные усталостные трещины. Вероятность возникновения таких трещин предлагается оценивать также на основе *FAT* для такого типа соединений. Вдали от концов рас-

считываемые сварные соединения соответствуют № 323 и имеют значение *FAT* = 90 МПа. В конце приваренного примыкающего элемента, имеющего плавный переход с радиусом  $r > 150$  мм (табл. 3), сварные соединения соответствуют № 522 и имеют также значение *FAT* = 90 МПа. Следует отметить, что высокие отрицательные напряжения  $\sigma_{zz}^H$  не являются помехой для инициирования усталостного повреждения, поскольку в этой зоне действуют высокие растягивающие остаточные продольные напряжения (на уровне  $\sigma_T$  основного материала, т. е. примерно 350...400 МПа), поэтому реальный цикл нагружения будет в зоне растяжения при  $R > 0,5$ , т. е. в зависимости (2) для допускаемого  $[\Delta\sigma]$  значение  $f_1(R) = 1,0$ .

Аналогичная ситуация наблюдается и при поперечном нагружении рассматриваемых сварных соединений, когда (см. табл. 2) нормативные постоянные напряжения в отрицательной зоне достигают значения  $-53$  МПа. Хотя поперечные остаточные напряжения при сварке редко превышают  $0,5\sigma_T$  ( $\sim 170$  МПа), тем не менее при указанных  $\sigma_{п}^H$  циклическое нагружение происходит в зоне растяжения.



Т а б л и ц а 4. Расчетная долговечность для точек вдоль осей 1–4 (см. табл. 2)

№ п/п	Ось 1			Ось 2		
	$N_1$ , цикл	$N_2$ , цикл	$N_3$ , цикл	$N_1$ , цикл	$N_2$ , цикл	$N_3$ , цикл
1	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$
2	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$6,8 \cdot 10^7$	$>10^8$	$7,4 \cdot 10^7$
3	$9,1 \cdot 10^7$	$>10^8$	$9,7 \cdot 10^7$	$4,3 \cdot 10^7$	$8,4 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^7$
4	$4,1 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^7$	$4,4 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^7$
5	$2,6 \cdot 10^7$	$4,7 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^7$
6	$1,9 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$
7	$2,2 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$
8	$5,2 \cdot 10^7$	$8,8 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^7$	$6,3 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^7$
9	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$
10	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$
11	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$

Примечания. 1.  $N_1$  — минимальная долговечность трех циклов (1);  $N_2$  — долговечность для спектра нагрузок по варианту 2);  $N_3$  — то же по варианту 3). 2. Для осей 3, 4 значения долговечности для всех циклов ( $N_1, N_2$  и  $N_3$ )  $>10^8$ .

**Результаты расчета долговечности сварных соединений узла арочного пилона.**

В табл. 4 приведены результаты расчета минимальной долговечности  $N$  по зависимости (9) для вариантов (1), исходные данные по которым приведены в табл. 2. Этот наиболее консервативный вариант регулярного циклического нагружения дает долговечность  $N$  выше  $10^7$  ( $1,7 \cdot 10^7$ ) циклов во всех рассматриваемых точках сварных соединений № 2, 3, 20–22 вдоль осей 1–4 (см. рис. 1). Для сравнения там же приведена долговечность  $N_{спек}$  по зависимости (11) для спектра циклических нагрузок (1) в каждом узле. Значения  $\alpha_j$  принимали в следующих пределах:

вариант 2): для  $\Delta\sigma_{max} \alpha_j = 0,9$ , остальные — 0,05;

вариант 3):  $\alpha_j = 1/3$  для  $j = 1...3$ .

Видно, что используемые схемы спектра нагрузок дают менее консервативные результаты по расчетной долговечности по сравнению с экстремальным вариантом регулярного циклического нагружения (1).

Для сварных соединений № 2, 3, 22 вдоль осей 1, 2 (см. рис. 1) долговечность по условию образования поперечных усталостных трещин определяется в виде (8)

$$N = C \left( \frac{FAT f_3(\delta)}{\Delta\sigma \gamma_M} \right)^m, \tag{12}$$

где  $C = 2 \cdot 10^6$ ,  $m = 3$  при  $10^4 < N < 5 \cdot 10^6$  циклов, или  $C = 2,54 \cdot 10^6$ ,  $m = 5$  при  $5 \cdot 10^6 < N < 10^8$  циклов;  $FAT = 90$  МПа;  $f_3(\delta)$  определяется по (6), т. е.  $f_3(\delta) = (25/32)^{0,3} = 0,93$ ;  $\Delta\sigma = 20$  МПа;  $\gamma_M = 1,4$ . Соответственно по (12) получим долговечность

$$N = C \left( \frac{918 \cdot 0,93}{208 \cdot 1,4} \right)^m = 5,5 \cdot 10^8 \text{ (циклов).}$$

В заключение можно отметить, что результаты расчета долговечности сварных соединений № 2, 3, 20–22 вдоль осей 1–4 сварного узла арочного пилона на основе заданных нагрузок и рекомендаций Международного института сварки, основанных на достаточно консервативном обобщении экспериментальных данных, полученных для типовых сварных соединений, показывают, что:

усталостная прочность указанных сварных соединений под действием поперечных номинальных напряжений не хуже  $1,7 \cdot 10^7$  циклов;

долговечность соединений вдоль осей 1, 2 под действием продольных номинальных напряжений не ниже  $10^8$  циклов.

Service life of welded joints on bridge arched pylons was predicted on the basis of the information on a range of loads and rated stresses in these joints.

Поступила в редакцию 05.10.2006